

浅谈相控阵天线技术在未来深空探测中的应用

石吉锋 洪家财 陈丹

(装备指挥技术学院, 北京 101416)

摘要: 针对大型反射面天线在未来深空探测中应用的限制因素, 总结了相控阵天线应用在深空探测中的优势, 并介绍了几种可行的相控阵天线方式, 分析了各自的优点与缺点。研究表明, 相控阵天线技术在未来深空探测中具有很广阔的应用前景。

关键词: 深空探测; 相控阵天线; 平面水平相控阵; 复合机械/电子引导阵列; 多面相控阵列

The Application of Phased Array Antennas to the Future Deepspace Exploration

SHI Ji-feng HONG Jia-cai CHEN Dan

(The Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)

Abstract: Compared to the restrictions of the large reflector antenna for the future deepspace exploration are, The advantages of phased array antennas for the future deepspace exploration are explained, and some alternative phased array configurations, whose advantages and shortcomings are analyzed, are presented in the following. The research shows that the application of phased array antennas to the future deepspace exploration has a good future.

Keywords: deepspace exploration; phased array antennas; planar horizontal phased array; hybrid mechanically/electronically steered array; multiple-face phased array

1 引言

近年来, 深空探测成为航天技术研究的热点。随着美国“机遇号”、“勇气号”火星探测器成功登陆火星, 深空探测技术受到航天大国的广泛重视, “嫦娥一号”绕月探测的成功实现, 是我国开展深空探测的新起点。以月球探测和火星探测为代表的深空探测将成为航天技术新的发展方向。

大口径高增益天线是提高深空探测测控信号接收效果的核心技术手段之一, 对深空探测技术的发展具有重要意义。随着天线口径的不断增大, 反射面天线的设计、制造、安装和应用带来一系列问题。相控阵天线具有大口径反射面天线的高增益, 而且具有波束捷变、可多波束工作、可靠性高、长期维护成本低的优点。在深空探测中应用相控阵天线可以提高数据传输速率和深空探测信号质量, 解决大口径反射面天线的一些问题。

2 深空探测

深空探测是脱离地球引力场, 对太阳系空间和宇宙空间开展的探测活动。深空通信是开展深空探测必

不可少的一个环节，是维系人与航天器的纽带，对航天器的正确控制及科学探测数据的接收，都需要可靠的通信作保障，而天线技术是实现信号发射和接收的关键技术。

随着天线口径的增大，反射面天线在深空探测中存在系统庞大、运行控制复杂和建设及运行成本过高等一系列的问题，对深空探测能力的进一步提高产生了瓶颈。相控阵天线技术是提高天线深空探测能力的主要方法之一。

3 相控阵天线及优缺点

3.1 相控阵天线

相控阵天线，是由许多辐射单元排列而成的阵列。按一定规律控制各个单元的相位差，利用电磁波的干涉现象，可以控制波束的方向。这样，雷达天线不动，扫描波束在一定范围内也可以偏转任意的角度。雷达要探测空间某个区域，发射的波束必须在这个区域内进行扫描，普通雷达要达到这一效果，就必须用机械方式驱动雷达天线转动或者俯仰，以改变扫描波束的指向。而相控阵天线雷达天线不用做机械转动，通过改变天线各辐射单元的相位差，就能实现波束在空间的扫描^[1]。

相控阵天线可分为有源相控阵天线和无源相控阵天线。有源相控阵天线包括 T/R 组件、阵列单元、馈电网络、移相器和波控机五个基本组成部分，阵列中每个单元有一个固态放大器；无源相控阵天线阵列单元中只有单独的一个射频功率源和一部接收机，图 1 利用图表给出了无源与有源的形象说明（只给出了发射阵）^[2]。

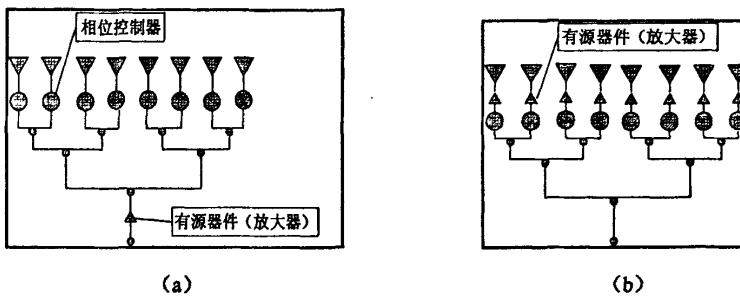


图 1 有源和无源阵列：(a) 无源阵；(b) 有源阵

3.2 相控阵天线的优缺点

随着固态器件技术的发展，较之大型反射面天线，相控阵天线在深空探测中的应用在技术可行性和长期经济性上体现出越来越大的优势。

相控阵天线的固有优点吸引了越来越多的组织机构进行研究。波束敏锐性：天线波束几乎可以瞬间移动到任何方向，这一点机械跟踪反射面天线不能企及。可靠性高：相控阵天线由许多阵列单元组成，在某些或许许多单元损坏后，仍可以继续工作，只是可靠性有所降低，而单反射面天线发生故障时，整个系统将会陷于瘫痪。可维护性：相控阵天线某些单元损坏后，整个系统在工作状态仍可寻址、操作及常规维修。而单反射面天线在发生故障时，必须停止工作进行维修。全电子扫描相控阵天线排除了机械故障，有效降低了维修成本。多波束工作能力：相控阵可以同时提供多个波束工作，实现对不同位置的多个飞船进行同时跟踪。多波束要通过复杂的波束形成网络来实现。长期维修成本降低：深空网反射面天线具有复杂的机械部件，需要长期地维护和维修，全电子扫描相控阵系统没有机械部件，长期维修成本大大降低。

相控阵天线同时存在不可避免的缺点。波束形成网络复杂：这可能是未来相控阵天线最明显的劣势。对来自上千甚至上百万个单元的信号进行差或和处理本身就很难实现，在多波束设备中就变得更加困难。

利用数字波束形成和处理方案可以降低复杂程度，但仍要比反射器天线复杂很多。有限的多频率工作能力：相控阵天线先天频带窄。通过适当的波束形成网络结构和实时延时单元能够某种程度上改变这种情况。通过增加在不同频段工作的阵列单元，可以将相控阵工作频率延拓至多个频段。增加新功能难度高（比如增加频段）：工作频率的任何改变要求全部阵列单元进行改变，而反射面天线系统整个系统只需对一个馈源进行修改替换。单平面阵列低仰角工作性能差：对于水平单口径阵列天线，当波束从垂直方向开始扫描时，阵列有效口径随扫描角度呈正弦衰减。方向图反常：由于单元互耦合表面波的存在，方向图可能产生栅瓣和盲点。先期造价高：由于单元众多，波束形成网络复杂，全功能相控阵系统先期造价很高^[3]。

4 可用于深空探测的相控阵结构

有许多相控阵结构或变形阵能用于未来深空探测任务。下面是几种更具选择性的方案，讨论中与美国深空网 70 米反射面天线性能进行比较^[3]。

4.1 平面水平相控阵

这种天线的峰值在垂直方向。由小的低增益阵元组成（阵元理论上能够半球覆盖，最大增益 3dB），为防止栅瓣出现，单元之间大约半波长间隔。如图 2 所示，该阵列每个单元经过适当相位调整，可以在要求的任意方向上实现统一波前，在半球面提供纯电子扫描。

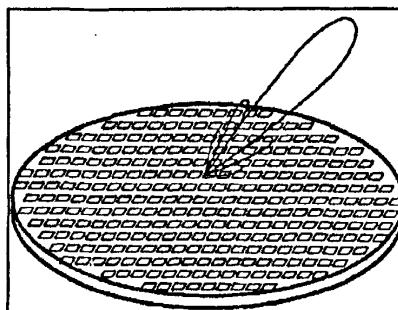


图 2 平面阵列天线方位扫描范围 $\pm 180^\circ$

但是会有随仰角正弦值变化的扫描损失（口径视轴方向），垂直方向损失 0dB， 30° 损失 3.0dB， 10° 仰角损失 7.6dB。低仰角时某些阵元的增益损失会造成阵列更高的增益损失。在此我们忽略了表面波和有限阵列边缘的衍射的影响。根据简化设计口径理论，在表面波和衍射影响下， 0° 仰角时有限元阵列损失难以趋近于 0。

为了 10° 仰角时有和 70 米反射器一样的增益，阵列口径尺寸 S ，与反射器口径相比的值 S_0 ，大约值为：

$$S = S_0 / \sin(10^\circ) \approx 5.8S_0 \text{ 或直径 } D = 2.4D_0 \approx 168m$$

向下 10° 仰角覆盖强制要求或许有些严格。扫描到这样的低仰角会引起很多问题，如盲点、表面波等。一个比较好的方法是减小扫描角度。例如如果最小扫描角度仅为 30° ，那么阵列尺寸仅仅是反射面天线的双倍即可，即 99 米直径。这样尺寸的阵列可以被选用，因为阵列在低于 30° 仰角扫描时仍可工作，只是增益较低（ 10° 时下降 4.6dB）。在 30° 或更高仰角时，阵列可用于高速数据接收，在低于 30° 仰角时，接收性能降低但工作性能仍可接受。

4.2 复合机械/电子引导阵列

如图 3 所示，一个选择是采用 50° 仰角平面阵列（离地面 40° 角）。这种阵列提供 $10^\circ \sim 90^\circ$ 仰角覆盖。

盖, 从峰值到 $\pm 40^\circ$ 最大扫描范围内损失只有 1.16dB 。能够提供在 10° 仰角时具有与反射面天线相同增益的阵列面积

$$S = S_0 / \sin(50) \approx 1.3S_0 \text{ 或直径 } D = 1.15D_0 \approx 80\text{m}$$

这种排列中, 电子扫描只有一个方向, 即垂直方向。水平面波束覆盖由机械旋转完成。理论上水平方向单元或多阵单元不需要相位变换器, 但如果要求对电子波束引导微调, 则只需在每一行上两个线性子阵之间安装一个相位变换器。每一行中的波束损耗可以通过采用串馈装置减小, 而不能使用并馈装置。这样牺牲了水平方向机械成本和复杂性, 而所需有源器件数量明显减少, 电子成本明显降低。

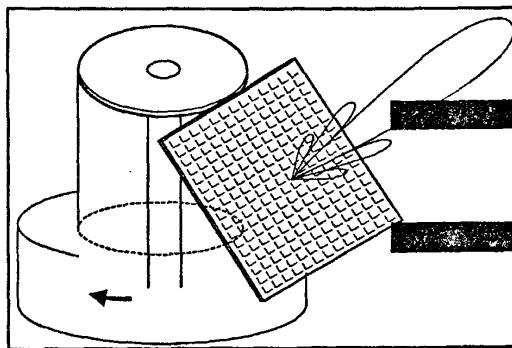


图3 机械旋转平面阵列天线(50° 仰角, 电子俯仰扫描范围 $\pm 40^\circ$)

4.3 多面相控阵列

另一个不需任何机械引导的实现方法是几个平面阵面金字塔排列^[4, 5]。图4是四面阵。每个面与地面成 45° 角。从水平到全球覆盖需要 $\pm 45^\circ$ 电子扫描。这种排列要求四个平面中每一个面:

$$S = S_0 / \sin(45) \approx 1.41S_0 \text{ 或直径 } D = 1.19D_0 \approx 83\text{m}$$

使得在 10° 仰角时与反射器有相同增益, 或者要求与反射器具有相同尺寸, 但这样会在覆盖范围边缘处有 1.5dB 的扫描损失。

图5是七面阵。顶是平面的, 每个面与地面成 60° 角, 从水平到满半球覆盖电子扫描 $\pm 30^\circ$ 。要求每个面:

$$S = S_0 / \sin(60) \approx 1.155S_0 \text{ 或直径 } D = 1.075D_0 \approx 75\text{m}$$

使得在 10° 仰角时与反射器有相同增益, 但这样会在覆盖范围边缘处有 0.6dB 的扫描损失。

在这种多面阵列中, 每次工作时只有其中的一个面工作, 按需接通开关就可以了。另一个优点是对不同的飞行器多个阵列可同时工作进行通信, 提供多波束覆盖。

以上是几种基于平面阵的相控阵结构, 还有许多其他可以采用的形式, 例如机械引导反射器相控阵、相控阵透镜天线、测量用球形相控阵天线、平板反射阵列等。

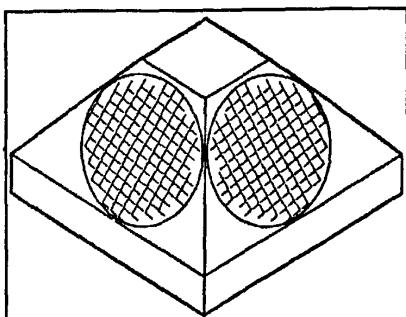


图4 四面相控阵天线排列, 每个阵列扫描范围 $\pm 45^\circ$

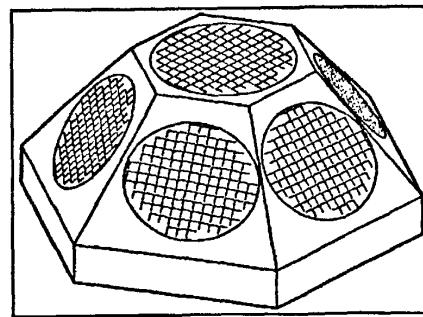


图5 七面相控阵天线排列, 每个阵列扫描范围 $\pm 30^\circ$

5 结束语

由以上分析和总结可以得出几点结论。

第一, 进行深空探测活动各航天大国势在必行, 而天线成为远距离通信的核心技术之一, 开展对相控阵天线技术在深空探测中应用的研究十分必要。

第二, 相控阵天线技术研究开始较早, 许多机构组织进行过相关研究, 并在阵列综合技术、馈电技术、阵列耦合技术和稀疏阵等技术上取得了突破, 已具备了开展深空探测中相控阵天线技术研究的条件。

第三, 相控阵天线自身的优点决定了其在深空探测中具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 千龙军事. 我国机载相控阵火控雷达发展[EB/OL]. <http://www.qianlong.com/2003.9.19>
- [2] Robert J.Mailoux 著, 南京电子技术研究所译. 相控阵天线手册[M]. 北京: 电子工业出版社 2007.1
- [3] V. Jamnejad, J. Huang, R. J. Cesarone. A Study of Phased Array Antennas for NASA's Deep Space Network[Z]. Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2001
- [4] G H. Knittel, Choosing the Number of Faces of a Phased-ArrayAntenna for Hemispherical Scan Coverage[A], IEEE Trans. Ant. Propagat., Vol. 13, No.6, pp. 878-882, November 1965
- [5] J.L. Kmentzo, An Analytical Approach to the Coverage of a Hemisphere by N Planar Phased Arrays[A], IEEE Trans.Ant. Propagat., Vol. 15, No.3, pp. 367-371, May 1967
- [6] William A. Imbriale. Large Antennas of the Deep Space Network[M]. Issued by Jet Propulsion Laboratory, February 2002

作者简介

石吉锋, 男, 1984 年生, 河北武邑人, 装备指挥技术学院在读硕士, 专业方向为信息传输理论与系统; 洪家财, 男, 1967 年生, 安徽霍邱人, 副教授, 博士, 装备指挥技术学院硕士生导师, 主要从事电磁场散射和天线技术研究;

陈 丹, 女, 1985 年生, 湖北宜昌人, 装备指挥技术学院在读硕士, 专业方向为电子对抗。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>